

Tomasz Łaczek

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Analiza zmian jakości biopaliw B100 zachodzących podczas ich magazynowania w niskich temperaturach

Artykuł przedstawia wyniki badań oraz ocenę zmian zachodzących w próbkach bioestrów B100 podczas przechowywania ich w niskiej temperaturze według ASTM D 7501:12a. Wykorzystując test zimnej filtracji CSFT, według ASTM D 7501 oraz w oparciu o wyniki oznaczeń wybranych właściwości fizykochemicznych i użytkowych próbek badanych biopaliw B100, określono czynniki powodujące wytrącanie osadów w trakcie ich magazynowania w temperaturze 4,5°C. Oceniono także wpływ związków organicznych obecnych w biopaliwach, które najprawdopodobniej wywołują sedymentację osadów (takich jak glicerole, sterole oraz glukozydy steroli) z biopaliwa przechowywanego w niskiej temperaturze.

Słowa kluczowe: biopaliwa, niska temperatura, magazynowanie, filtracja, osady.

### Analysis of changes in the quality of B100 biofuels during storage at low temperatures

The article presents the results of research and evaluation of changes taking place in samples of B100 biofuels during storage at low temperature according to ASTM D 7501:12a are presented. Utilizing of cold filtration test (ASTM D 7501) and taking into consideration selected physicochemical properties of tested B100 biofuels, several factors causing sediments precipitations, when stored at the temperature of 4.5°C were determined. The properties of biofuels at low temperature were analyzed. The influence of organic compounds, presumably responsible for the precipitation of sediments out of biofuels stored at low temperature – glycerols, sterols and sterols glucosides – was also investigated.

Key words: biofuels, low temperature, stored, filtration, sediments.

### Wstęp

Wzrost zapotrzebowania na estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych (FAME), jako komponentów paliw, spowodował, że na rynku zaczęły pojawiać się biokomponenty oraz gotowe biopaliwa o nieodpowiedniej jakości. Wywoływały one wiele problemów eksploatacyjnych w trakcie transportu i magazynowania, jak również podczas użytkowania w pojazdach samochodowych w warunkach zimowych. Wykonane w INiG – PIB badania obecnych na polskim rynku biopaliw B100 wykazały występowanie procesów sedymentacji osadów w analizowanych próbkach w trakcie przechowywania w niskiej temperaturze [7, 8].

Jeszcze do niedawna oznaczenie czterech parametrów (temperatury mętnienia CP, temperatury zablokowania zimnego filtra CFPP, temperatury płynięcia PP oraz filtracji w niskiej temperaturze LTFT) wystarczało do określenia właściwości biodiesla w trakcie eksploatacji w niskiej temperaturze. Parametry te nie określały skłonności biopaliwa do tworzenia osadów powyżej temperatury mętnienia CP dla danego biopaliwa. Konsekwencją braku takiej oceny było wytrącanie osadów, które zatykały elementy instalacji magazynowej oraz filtry paliwowe w warunkach zimowych (odnotowano np. liczne przypadki w stanie Minesota) [4].

W celu szybkiej oceny jakości biopaliw i zachowania się ich w trakcie przechowywania w warunkach zimowych, opracowano nowy test filtracji [2, 4, 10].

Test wprowadzono zgodnie z wymaganiami normy ASTM D 6751 [1] jako oznaczenie do oceny jakości i czystości biopaliw typu B100 w oparciu o pomiar czasu filtracji po przechowywaniu w niskiej temperaturze. Już wstępne wyniki CSFT potwierdziły fakt występowania sedymentacji zanieczyszczeń z biopaliw oraz wykazały, że im niższa temperatura przechowywania i dłuższy czas magazynowania, tym większa ilość osadu opada na dno zbiornika [4]. Dalsze prace nad biopaliwami oraz rozwijanie testu filtracji CSFT zaowocowały kolejnymi wnioskami, które dowodzą, że – oprócz zanieczyszczeń pochodzących z procesów technologicznych przerobu olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych do estrów wyższych kwasów tłuszczowych (FAME) – w niskich temperaturach następują również zmiany w strukturze chemicznej biopaliw. W przypadku zanieczyszczeń poprodukcyjnych, opadające w czasie sedymentacji cząstki mogą przybierać różne formy, w zależności od użytego surowca oraz źródła pochodzenia (np. z olejów roślinnych, z olejów odpadowych, z tłuszczów zwierzęcych, podczas tłoczenia ziaren na zimno). Występujące zanieczyszczenia poprodukcyjne w biopaliwach można łatwo wyeliminować przy zastosowaniu procesów wielostopniowej filtracji [4, 9].

Sytuacja przedstawia się inaczej w przypadku drobnych cząstek zawieszonych w bioestrach, które pod wpływem niskiej temperatury łączą się w większe formy i opadają na dno

zbiorników magazynowych. Osady tego typu w biopaliwach (występujące powyżej temperatury mętnienia CP) tworzone są przez obecne w bioestrach związki organiczne, takie jak: MAG (monoacyloglicerole), sterole, glukozydy steroli oraz inne składniki [10].

Nasycone monoacyloglicerole oraz sterole są nieprze-reagowanym produktem w procesie produkcji bioestrów. Tego rodzaju zanieczyszczenia posiadają stosunkowo niską rozpuszczalność w oleju napędowym, która jest wprost proporcjonalna do temperatury otoczenia/magazynowania.

Oprócz steroli oraz monoglicerydów w literaturze sporo miejsca poświęca się także glukozydom steroli, które w dużej ilości występują w biopaliwach [3, 6, 10]. Związki te, ze względu na swoje właściwości polarne i ograniczoną rozpuszczalność, mogą przyspieszać tworzenie się osadów nawet w temperaturze pokojowej i ewentualnie blokować filtry paliwowe [5]. Glukozydy steroli, które są naturalnymi składnikami olejów roślinnych i tłuszczów, występują w postaci rozpuszczalnej, jednak podczas produkcji FAME zmieniają swoją strukturę na nierozpuszczalną. Ze względu na wyższą temperaturę topnienia i ich nierozpuszczalność w B100 oraz w oleju napędowym, cząsteczki glukozydów steroli można traktować jako rozproszone cząstki stałe zawieszone w strukturze FAME, które mogą inicjować krystalizację i wytrącanie się innych związków. Również niska temperatura otoczenia/przechowywania może przyspieszyć ten proces i zwiększyć prawdopodobieństwo zadziałania glukozydów steroli jako zarodków krystalizacji większych skupisk osadów.

### Cel badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie przyczyn wytrącania osadów w biopaliwach B100 w trakcie ich magazynowania w niskiej temperaturze. Koncepcja pracy przewidywała przygotowanie pięciu próbek biopaliw B100, w których zostaną oznaczone wybrane właściwości fizykochemiczne przed przechowywaniem w niskiej temperaturze oraz po okresie magazynowania.

Przeprowadzone badania oraz analiza otrzymanych wyników próbek biopaliw B100 pozwoliły na wskazanie przyczyn pogarszania się jakości tego rodzaju paliw w trakcie magazynowania w komorze zimna, jak również wyznaczyć bezpieczne stężenie zawartości związków organicznych obecnych w biopaliwach B100, które odpowiadają za wytrącanie osadów w niskiej temperaturze.

### Przebieg badań

W badaniach wykorzystano próbki biopaliw B100 dostępne na rynku paliw w okresie zimowym oraz letnim. W tabelicy 2 zestawiono wyniki z filtracji CSFT, według metody ASTM D 7501:12a, pięciu wytypowanych do badań próbek biopaliw B100. Pomiar czasu filtracji oraz objętość filtratu oznaczono w próbkach przed magazynowaniem w niskiej temperaturze i po 16 godzinach przechowywania w komorze zimna w temperaturze 4,5°C.

Otrzymane wyniki czasów filtracji biopaliw przed i po

magazynowaniu w komorze zimna przedstawiono w tabelicy 1 i na rysunku 1.

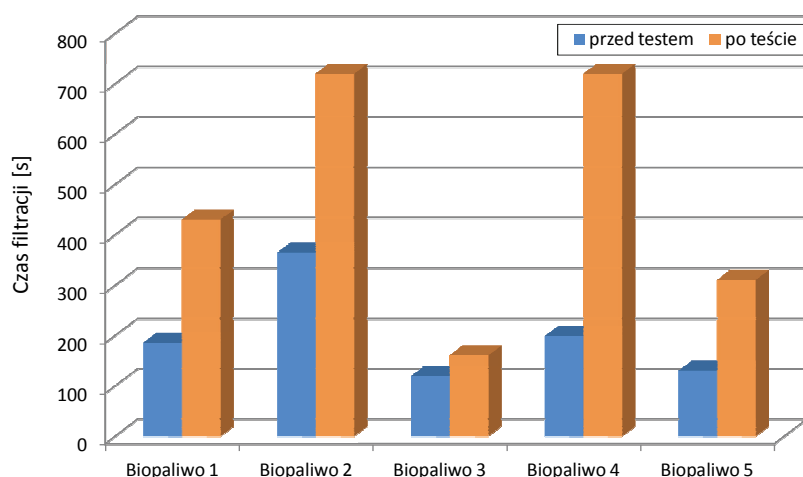
W przedstawionych wynikach badań czasów filtracji można zaobserwować pogorszenie się tego parametru we wszystkich pięciu próbkach biopaliw B100 w stosunku do czasów uzyskanych przez próbki wyjściowe.

Porównując wyniki filtracji przed i po procesie przechowywania w niskiej temperaturze, można stwierdzić, że dłuższe czasy filtracji próbek spowodowane są wytrącaniem

Tablica 1. Wyniki czasów filtracji dla próbek biopaliw przed i po magazynowaniu w niskiej temperaturze

Kod próbki / Właściwości	Jednostka	Wyniki badań <sup>*)</sup>				
		Biopaliwo 1	Biopaliwo 2	Biopaliwo 3	Biopaliwo 4	Biopaliwo 5
Przed magazynowaniem	s	186	365	120	199	131
Po magazynowaniu	s	430	720	161	720	311

<sup>\*)</sup>Otrzymane wyniki badań (wartości średnie z trzech powtórzeń) mieszczą się w wyznaczonej precyzji metody według dokumentacji INiG 1618/TP/2011 oraz według ASTM D 7501:12a



Rys. 1. Czas filtracji biopaliw B100 przed i po magazynowaniu w temperaturze 4,5°C

się znacznej ilości osadów podczas magazynowania biopaliw w niskiej temperaturze, tj. 4,5°C. W celu określenia przyczyn zmian biopaliw, w następnych punktach pracy poddano analizie właściwości niskotemperaturowe oraz oznaczono stężenia gliceroli, steroli i glukozydów steroli w próbkach bioestrów przed i po magazynowaniu w niskiej temperaturze.

Tablica 2. Wyniki badań parametrów niskotemperaturowych dla próbek biopaliw przed i po magazynowaniu w niskiej temperaturze

Kod próbki	Oznaczana właściwość	Jednostka	Wyniki badań <sup>*)</sup>	
			Przed magazynowaniem	Po magazynowaniu w niskiej temperaturze
Biopaliwo 1	CP	°C	-2,2; -2,5	-2,4; -2,3
	CFPP	°C	-12; -12	-10; -12
Biopaliwo 2	CP	°C	-4,8; -4,5	-4,4; -4,5
	CFPP	°C	-13; -15	-15; -16
Biopaliwo 3	CP	°C	-5,2; -5,3	-5,1; -5,5
	CFPP	°C	-20; -20	-20; -22
Biopaliwo 4	CP	°C	-2,8; -3,0	-2,9; -3,3
	CFPP	°C	-12; -12	-13; -13
Biopaliwo 5	CP	°C	-5,0; -5,0	-4,9; -5,0
	CFPP	°C	-20; -21	-21; -20

<sup>\*)</sup>Uzyskane wyniki oznaczeń CP i CFPP mieszczą się w wyznaczonej precyzji metody badawczej według PN-EN 116:01 oraz PN ISO 3015:97

W tablicy 2 przedstawiono otrzymane wyniki oznaczeń temperatury mętnienia CP oraz temperatury zablokowania zimnego filtra CFPP dla pięciu badanych próbek bioestrów.

Zebrane w tablicy 2 wyniki badań właściwości niskotemperaturowych, tj. temperatury mętnienia CP oraz temperatury zablokowania zimnego filtra CFPP, wskazują, że w trakcie magazynowania próbek bioestrów B100 w niskiej temperaturze (zgodnie z wymaganiami testu ASTM D 7501, tj. 4,5°C) nie następuje pogorszenie ich parametrów niskotemperaturowych. W temperaturze magazynowania 4,5°C nie zaobserwowano żadnych niepokojących objawów zmian jakości badanych bioestrów (takich jak: zmętnienie próbek lub wytrącanie

węglowodorów n-parafinowych).

Kolejnym punktem badań była ocena wpływu gliceroli na biopaliwa w trakcie magazynowania w niskiej temperaturze. Glicerole obecne w bioestrach są efektem procesu transestryfikacji tłuszczów roślinnych i zwierzęcych.

Znaczne stężenie tych związków w biopaliwach może być

przyczyną wytrącania osadów z biopaliw B100 podczas transportu i magazynowania w warunkach zimowych. Nieodpowiednie oczyszczenie bioestrów z gliceroli w procesie produkcji biodiesla już na samym początku będzie skutkowało wprowadzaniem na rynek paliw produktu o niskiej jakości, niespełniającego wymagań jakościowych.

W tablicy 3 przedstawiono wyniki oznaczeń glicerolu wolnego, monoacylogliceroli, diacylogliceroli, triacylogliceroli oraz całkowitej zawartości gliceroli.

Przedstawione w tablicy 3 wyniki badań wpływu gliceroli na struktury próbek biopaliw

Tablica 3. Wyniki badań zawartości gliceroli w próbkach biopaliw przed i po magazynowaniu w temperaturze testu według ASTM D 7501

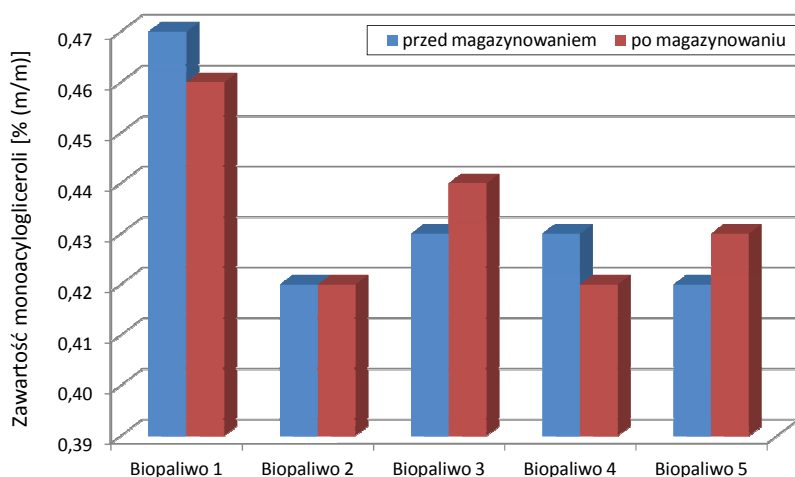
Oznaczenia	Wyniki badań <sup>1)*)</sup>									
	Biopaliwo 1		Biopaliwo 2		Biopaliwo 3		Biopaliwo 4		Biopaliwo 5	
	przed	po <sup>2)</sup>	przed	po <sup>2)</sup>	przed	po <sup>2)</sup>	przed	po <sup>2)</sup>	przed	po <sup>2)</sup>
Glicerol wolny [% (m/m)]	0,007	0,007	0,010	0,010	0,002	0,003	0,010	0,010	0,008	0,008
Monoacyloglicerole [% (m/m)]	0,47	0,46	0,42	0,42	0,43	0,44	0,43	0,42	0,42	0,43
Diacyloglicerole [% (m/m)]	0,18	0,18	0,19	0,19	0,11	0,11	0,24	0,24	0,15	0,15
Triacyloglicerole [% (m/m)]	0,12	0,12	0,16	0,16	< 0,10	< 0,10	0,25	0,24	0,11	0,11
Glicerol ogólny [% (m/m)]	0,17	0,16	0,16	0,16	0,13	0,13	0,18	0,18	0,14	0,14

<sup>1)</sup> Metoda według PN-EN 14105:2011 *Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME)*

<sup>2)</sup> Przechowywanie próbek w temperaturze 4,5°C przez 16 h według ASTM D 7501

<sup>\*)</sup> Wyniki badań są zgodne z precyzją metody badań według PN-EN 14105:2011

B100 (pod kątem zmiany jakości w trakcie przechowywania w niskiej temperaturze) nie wskazują, aby glicerole powodowały pogorszenie jakości tych biopaliw. Próbkę biopaliw w zakresie zawartości wolnego i ogólnego glicerolu, diacylogliceroli oraz triacylogliceroli nie zmieniły się bądź też uległy nieznacznym wahaniom w granicy błędu. Szczegółowej analizie poddano wyniki oznaczeń monoacylogliceroli w próbkach, gdyż te związki organiczne są wymieniane jako główny czynnik w procesach tworzenia i sedymentacji zanieczyszczeń podczas magazynowania biopaliw w niskiej temperaturze [5, 10].



Rys. 2. Zawartość monoacylogliceroli w próbkach biopaliw B100 przed i po magazynowaniu

Z poddanych analizie pięciu biopaliw B100 w czterech przypadkach odnotowano minimalne zmiany w zawartości monoacylogliceroli (tablica 3 i rysunek 2). W próbce Biopaliwo 2 nie zaobserwowano przeobrażeń w ilości monoacylogliceroli przed testem magazynowania i po nim. Minimalne zmiany monoacylogliceroli w próbkach pokazują, że ich ilość

podczas magazynowania nie ulega istotnym przekształceniom i nie wpływa na znaczny wzrost zanieczyszczeń w badanych biopaliwach (próbki 1, 3, 4 i 5).

Podsumowując wyniki oznaczeń gliceroli, należy stwierdzić, że nie powodują one istotnych zmian w strukturze biopaliw B100 podczas magazynowania w temperaturze 4,5°C.

Ostatnim etapem badań było oznaczenie zawartości steroli oraz glikozydów steroli w próbkach biopaliw B100 podczas przechowywania ich w warunkach zimowych. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 4.

Wyniki te pokazują, że niska temperatura przechowywania (4,5°C) oraz czas przechowywania próbek bioestrów nie wpływają w istotny sposób na ilość oznaczonych steroli. Zmiany całkowitej ilości steroli można zauważyć tylko w dwóch z pięciu badanych próbek. Zaobserwowane różnice w liczebności steroli – na poziomie 0,01% (m/m) w próbkach 2 i 5 – są minimalne i nie mogą wpływać na strukturę chemiczną bioestrów podczas przechowywania ich w niskiej temperaturze. Dowodem potwierdzającym tę tezę są wyniki pozostałych przebadanych próbek, w których całkowita ilość steroli przed i po magazynowaniu nie zmieniła się.

Kolejną substancją oznaczoną w badanych próbkach bioestrów były glikozydy steroli. Jak już stwierdzono w początkowej części pracy, są to związki, które ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne (słaba rozpuszczalność w FAME i we frakcjach naftowych) mogą wpływać na zmiany ilości osadów w próbkach.

Proces transestryfikacji prowadzi do zwiększenia stężenia formy wolnej glikozydów steroli w FAME w stosunku do surowca wyjściowego. Wyniki przedstawione w tabli-



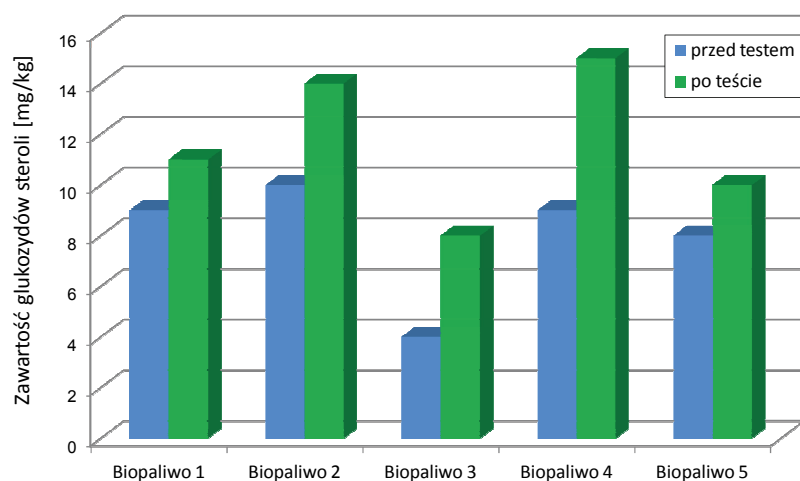
Tablica 4. Wyniki badań zawartości steroli i glukozydów steroli w próbkach biopaliw przed i po magazynowaniu w temperaturze 4,5°C, według ASTM D 7501

Oznaczenia	Wyniki badań <sup>*)</sup>									
	Biopaliwo 1		Biopaliwo 2		Biopaliwo 3		Biopaliwo 4		Biopaliwo 5	
	przed	po <sup>1)</sup>	przed	po <sup>1)</sup>	przed	po <sup>1)</sup>	przed	po <sup>1)</sup>	przed	po <sup>1)</sup>
Brassicasterol [% (m/m)]	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Campesterol [% (m/m)]	0,10	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,12
B-Sitosterol [% (m/m)]	0,16	0,16	0,19	0,20	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21
SUMA Steroli [% (m/m)]	0,31	0,31	0,37	0,38	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,37
Wolne glukozydy steroli [mg/kg]	9	11	10	14	3	7	9	15	8	10

<sup>1)</sup> Przechowywanie próbek w temperaturze 4,5°C przez 16 h, według ASTM D 7501

<sup>\*)</sup> Wyniki badań są zgodne z precyzją metod badań INiG – PIB

cy 4 i na rysunku 3 pokazują tendencję wzrostu zawartości wolnych glukozydów steroli w próbkach przechowywanych w niskiej temperaturze przez 16 godzin.



Rys. 3. Całkowita zawartość glukozydów steroli w próbkach przed i po teście magazynowania

We wszystkie badanych próbkach, po magazynowaniu w niskiej temperaturze, stwierdzono wzrost zawartości glukozydów steroli w stosunku do próbek wyjściowych.

Odnosząc otrzymane wyniki zawartości glukozydów steroli do czasów filtracji próbek, można zauważyć, że w próbkach:

1, 2 i 4, w których zawartość glukozydów steroli przekracza poziom 8 mg/kg, następuje po okresie przechowywania w komorze zimna efekt blokowania filtra i wzrost czasów filtracji, co wiąże się z występowaniem większej ilości osadów. W próbkach 3 i 5 (tablica 4), zawierających poniżej 8 mg/kg glukozydów steroli, również widoczne jest pogorszenie filtracji, jednak wyznaczone jej czasy mieszczą się w limitach wymaganych przez ASTM D 6751, tj. dla biopaliw eksploatowanych w warunkach zimowych w temperaturze do -12°C (czas filtracji < 360 s) oraz w temperaturze do -20°C (czas filtracji < 200 s).

Wyznaczenie dla biopaliw czasu filtracji według ASTM D 6751 pozwala na uzyskanie pewności, że w trakcie ich transportu, magazynowania oraz użytkowania nie będą pojawiały się kłopoty z zatykaniem elementów instalacji lub filtrów paliwowych przez glukozydy steroli.

Jak wykazano w tej pracy, glukozydy steroli są głównymi związkami organicznymi, które negatywnie wpływają na biopaliwa magazynowane w niskiej temperaturze. Maksymalny limit tych związków w biopaliwach wyjściowych nie powinien być wyższy niż 8 mg/kg (na podstawie wyników z tablicy 4 i rysunku 3).

### Analiza otrzymanych wyników

Próbki bioestrów wykorzystane w trakcie realizacji tej pracy są typowymi biopaliwami B100 dostępnymi na polskim rynku paliw. Otrzymane wyniki badań niskotemperaturowych wybranych bioestrów B100 świadczą, że trzy biopaliwa można eksploatować w warunkach zimowych (temperatura mętnienia CP około -5°C), natomiast pozostałe dwa bioestry mogą być stosowane w warunkach przejściowych lub letnich.

W celu określenia wpływu parametrów niskotemperaturowych na magazynowane biopaliwa, przygotowane próbki przechowywano w komorze zimna w temperaturze 4,5°C przez 16 h. Po tym czasie oznaczono temperaturę mętnienia CP i zablokowania zimnego filtra CFPP. Otrzymane wyniki wskazują, że pomimo obecności większej ilości osadów w próbkach po magazynowaniu w niskiej temperaturze nie

odnotowano pogorszenia parametrów niskotemperaturowych biopaliw. Oprócz właściwości niskotemperaturowych, w celu identyfikacji rzeczywistych przyczyn powstawania osadów w bioestrach, wykonano oznaczenia gliceroli, steroli oraz glukozydów sterolu, tj. związków wskazywanych w literaturze jako odpowiedzialne za zanieczyszczanie biopaliwa podczas magazynowania.

Analiza wyników uzyskanych dla próbek bioestrów przed przechowywaniem w komorze zimna (próbki wyjściowe), jak i próbek po 16 godzinach przechowywania, pozwoliła stwierdzić, że próbki wyjściowe zawierające małą ilość gliceroli oraz steroli nie będą powodować w czasie eksploatacji problemów z wytrącaniem osadów. Nieznaczne zmiany monoacylogliceroli lub steroli na poziomie 0,01% (m/m) nie generują przemian w strukturze biopaliw, a tym samym – nie odpowiadają za wytrącanie osadów w trakcie ich magazynowania w niskiej temperaturze.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 2, s. 115–120

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Analiza zmian jakości biopaliw B100 zachodzących podczas ich magazynowania w niskiej temperaturze*. Praca powstała na zlecenie MNiSW, nr archiwalny DK-4100-43/13, numer zlecenia 0043/TP/13/01.

## Literatura

- [1] ASTM D 6751:12 *Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock Fuels*.
- [2] ASTM D 7501:12a *Standard Test Method for Determination of Fuel Filter Blocking Potential of Biodiesel (B100) Blend by Cold Soak Filtration (CSFT)*.
- [3] Burnus Z.: *Badanie zawartosci wolnych glukozydow steroli w oleju napedowym z dodatkiem FAME*. Materiały konferencyjne – Konferencja Naukowo-Techniczna, XII Forum Dyskusyjne Sekcji PETROL-GAZ – *Terazniejszosc oraz przyszlosc paliw cieklych i gazowych, a takze plynow eksploatacyjnych pochodzenia naftowego i nienaftowego stosowanych w silnikach samochodowych*. Zamosc, 5–7 czerwca 2013.
- [4] Davis B.: *Effective biofuel filtration*. Biofuels International, styczeń 2010, pp. 48–51.
- [5] Hongjian L. et al: *Effect of trace contaminants on cold soak filterability of canola biodiesel*. Fuel 2011, vol. 90, Issue 5, pp. 1771–1777.
- [6] Huali W. et al: *Analysis of Sterol Glycosides in Biodiesel and Biodiesel Precipitates*. Journal of the American Oil Chemists Society 2010, vol. 87, pp. 215–221.
- [7] Łaczek T.: *Filtracja jako metoda oceny FAME*. Nafta-Gaz 2011, nr 11, s. 831–835.
- [8] Łaczek T.: *Wdrozenie metody oceny przydatnosci estrow metylowych kwasow tluszczowych (FAME) do komponowania biopaliw w oparciu o test filtracji po sezonowaniu w niskich temperaturach*. Dokumentacja INiG, czerwiec 2010.
- [9] Sacha D.: *Nowe narzedzia badawcze do oceny wlasciwosci uzytkowych paliw do silnikow o zaplonie samoczynnym*. Nafta-Gaz 2012, nr 2, s. 133–137.
- [10] Shang-Tian Yang, Hesham El-Enshasy, Nuttha Thongchul: *Bioprocessing technologies in biorefinery for sustainable production of fuels chemicals and polymers*. AIChE. May 2013, p. 214.



Mgr inż. Tomasz ŁACZEK  
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Paliw i Procesów Katalitycznych.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: [tomasz.laczek@inig.pl](mailto:tomasz.laczek@inig.pl)